

# 球形红细菌厌氧降解邻二氯苯及其机理研究

王玉芬<sup>1,2</sup> 张肇铭<sup>2,3\*</sup> 胡筱敏<sup>2</sup> 贡俊<sup>1</sup>

(1. 山西财经大学环境经济系 太原 030006)

(2. 东北大学资源环境与土木工程学院 沈阳 110004)

(3. 山西大学生命科学与技术学院 太原 030006)

**摘要:** 研究分析光合细菌球形红细菌在厌氧光照条件下降解邻二氯苯的条件和机理。结果表明,在厌氧光照条件下球形红细菌的最佳生长和对邻二氯苯的最佳降解条件为: pH 7.0, 温度为 30℃, 接种量 10%。在最佳条件下, 邻二氯苯的去除率可达 90% 以上; 其降解中间产物主要有氯苯、4-羟基苯甲酸; 根据降解产物的分析, 推断球形红细菌降解邻二氯苯的机理主要是按照先脱掉一个氯原子生成氯苯, 然后氯苯进一步脱氯并通过 4-羟基苯甲酸的代谢途径开环进行。

**关键词:** 光合细菌, 球形红细菌, 厌氧降解, 邻二氯苯

## Study on Mechanisms and Anaerobic Degradation of 1,2-Dichlorobenzene by *Rhodobacter sphaeroides*

WANG Yu-Fen<sup>1,2</sup> ZHANG Zhao-Ming<sup>2,3\*</sup> HU Xiao-Min<sup>2</sup> GONG Jun<sup>1</sup>

(1. Department of Environmental Economics, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006)

(2. School of Resource Environment and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004)

(3. College of Life Science and Technology, Shanxi University, Taiyuan 030006)

**Abstract:** The influences of several factors on the growth and removal for 1,2-Dichlorobenzene of *Rhodobacter sphaeroides* under phototrophic (anaerobic in light) condition were analyzed in this study. The results demonstrated that the optimum conditions for the growth of the strain and the removal rate for 1,2-Dichlorobenzene were pH 7.0, temperature at 30℃ and inoculation amount of 10% under phototrophic condition. The removal rate for 1,2-Dichlorobenzene reached 90% under the optimal conditions. Furthermore, analysis of degradation products of 1,2-dichlorobenzene by the strain tested showed that chlorobenzene, 4-hydroxybenzoate were formed. The probable degradative routes taken in the anaerobic metabolism of chlorinated aromatic compounds by *Rhodobacter sphaeroides* were that they are metabolized anaerobically to form chlorobenzene, and then chlorobenzene was dechlorinated and passed through 4-hydroxybenzoate routes for aromatic ring cleavage.

**Keywords:** Photosynthetic bacteria, *Rhodobacter sphaeroides*, Anaerobic degradation, 1,2-Dichlorobenzene

随着工农业的发展, 进入环境中的人工合成化合物越来越多, 其中氯苯类化合物所占的比例也日

趋增大。氯苯类化合物不仅物理化学性质稳定、生物难降解、在环境中能长期稳定存在, 而且大多是

具有“三致”作用的化合物, 其中氯苯、邻二氯苯、间二氯苯、对二氯苯、1,2,4-三氯苯和六氯苯等被美国环保局(EPA)列为优先控制污染物<sup>[1]</sup>; 我国也将氯苯、1,2-二氯苯、1,4-二氯苯、六氯苯等列入68种优先污染物“黑名单”<sup>[2]</sup>。在我国制订的地表水卫生标准、地表水环境质量标准(GB3838-2002)以及污水综合排放国家标准(GB8978-1996)中都对氯苯类化合物的浓度作了具体的规定。为寻找一种经济有效的降解水中氯苯类化合物的方法, 近年来各国学者对利用微生物处理氯苯类化合物废水做了大量的研究, 目前人们从受氯苯类化合物污染的水体、底泥和土壤中已经发现并分离出许多种能够降解氯苯类化合物的微生物<sup>[3-10]</sup>。

光合细菌(*Photosynthetic Bacteria* 简称PSB)是具有原始光能合成体系的原核生物, 能在厌氧光照条件下进行不放氧光合作用。特别是紫色非硫细菌不仅能在厌氧光照的条件下进行光能异养生长, 而且能在好氧黑暗条件下进行好气异养生长。即具有随着生存环境而灵活地改变代谢类型的特性, 与其它微生物相比具有一定的优越性。因此, 光合细菌在染料、芳香化合物等有机废水的处理中得到广泛的应用<sup>[11-14]</sup>。球形红细菌(*Rhodobacter sphaeroides*)属于光合细菌紫色非硫菌群的红细菌属, 在厌氧条件下对氯苯具有较强的耐受和降解能力<sup>[15,16]</sup>, 但是利用球形红细菌活细胞在厌氧条件下转化去除二氯苯的研究国内外尚未见报道。

本文系统研究了光合细菌球形红细菌厌氧降解邻二氯苯的条件和机理, 为该菌株在氯苯类化合物废水污染治理中的应用提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验材料

菌种: 球形红细菌(*Rhodobacter sphaeroides*)S菌株系紫色非硫菌群红细菌属光合细菌, 由山西大学光合细菌研究室分离、鉴定并保存。

基础培养基: 采用光合细菌降解氯苯的最佳液体培养基酵母膏 1.0 g、MgSO<sub>4</sub> 0.2 g、CaSO<sub>4</sub> 0.093 g、(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.1 g、苹果酸 1.0 g、KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 0.6 g、K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 0.9 g、蒸馏水 1000 mL, pH 7.0<sup>[16]</sup>。

驯化培养基: 基础培养基加适量邻二氯苯。

邻二氯苯(分析纯): 天津光复精细化工研究所

生产。

甲醇(色谱纯): 天津市登峰化学试剂厂生产。

4-羟基苯甲酸(分析纯): 上海化学试剂总厂生产。

### 1.2 实验方法

1.2.1 菌种的驯化: 将10%原始菌液接入邻二氯苯含量为50 mg/L的驯化培养基, 在30℃、2000 Lx光照培养箱中厌氧驯化培养3 d作为驯化菌种。

1.2.2 S菌株生长与邻二氯苯降解实验: 在无菌条件下, 将一定量驯化后的菌悬液10000 r/min离心10 min, 弃上清液, 菌体用磷酸缓冲液洗涤2次后导入含100 mg/L邻二氯苯的培养液中, 分别考察不同pH值、温度和接种量对邻二氯苯的去除及菌株生长的影响。规定条件为: 厌氧光照培养(葡萄糖瓶装满培养物, 盖橡皮塞; 光照度: 2500 Lx, 静置), pH 7.0, 温度30℃, 接种量为10%(V/V)。实验过程中, 改变1个影响因素, 固定其它条件, 进而确定最佳的生长与去除条件。反应完毕后取样, 先测试菌体浓度OD值, 然后样品经10000 r/min离心10 min后, 取上清液测邻二氯苯、氯苯、4-羟基苯甲酸、氯离子等降解产物浓度。每组实验均设2个平行, 重复3次。

### 1.3 分析方法

1.3.1 菌体浓度: 菌体浓度用UV-2102PC型紫外可见分光光度计(UNICO), 在最大吸收波长580 nm处测定菌液浓度(OD<sub>580</sub>值)。

1.3.2 邻二氯苯、氯苯浓度的测定: 邻二氯苯、氯苯浓度采用高效液相色谱法(SHIMADZU LC-10ATVP)。分离柱为Nova2Pak C18, 4 Lm, 3.9 mm × 150 mm; 紫外检测器, 检测波长254 nm; 流动相为甲醇/水(75:25, V/V); 流速1.0 mL/min, 进样量10 μL。邻二氯苯出峰时间为9.0 min, 氯苯出峰时间为5.4 min。

1.3.3 氯离子浓度测定: 氯离子浓度采用离子色谱(TL9900 色谱工作站A通道)测定。分析条件, 流动相为邻苯二甲酸; 柱温35℃; 电导检测器为CDD-6A; 流速为1.5 mL/min; 进样量20 μL。

1.3.4 4-羟基苯甲酸浓度的测定<sup>[17]</sup>: 根据在强碱性的环境下, 4-羟基苯甲酸可以电离形成4-羟基苯甲酸阴离子, 4-羟基苯甲酸阴离子在波长280 nm处有强的吸收峰这一原理测定4-羟基苯甲酸的含量。具

体方法为：先采用氢氧化钠调节试样的pH值到 14，然后用紫外可见分光光度计在 280 nm处测定试样的吸光度值。

**1.3.5 GC-MS 分析降解产物：**试样经 10000 r/min 离心 10 min，取上清液用 0.22  $\mu\text{m}$  滤膜过滤后采用美国 Agilent 公司 HP5973 GC-MS TaKmar 3000 purge-Trap 仪器分析。

气相条件：以高纯氦气(99.999%)为载气，恒流 1.3 mL/min；进样方式：不分流进样；进样口温度：200；柱温：起始为 40，升温程序为：先以 15 /min 升至 95 后，再以 2.5 /min 至 105，最后以 5 /min 升至 200。

色谱柱规格：HP-VOC, 60 m  $\times$  0.32 mm  $\times$  1.8  $\mu\text{m}$ 。

质谱条件：离子源温度：200；四级杆温度：150；接口温度：200；倍增电压 1600V；发射电子能 70 eV；扫描范围：34 amu~300 amu；扫描速率：1.97 次/s。

吹扫捕集条件：以高纯氦气为吹扫气，样品吹扫温度：30；吹扫时间：11 min；解脱温度：150~200；解脱时间：4 min。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同起始 pH 对 S 菌株降解邻二氯苯的影响

在含 100 mg/L 邻二氯苯浓度的培养基中，接入 10%的驯化后的 S 菌株，在 pH 分别为 5.0、6.0、7.0、8.0、9.0 和 10.0 的条件下，厌氧光照培养 3 d 后测定降解液中邻二氯苯的浓度和细菌浓度(OD)值。

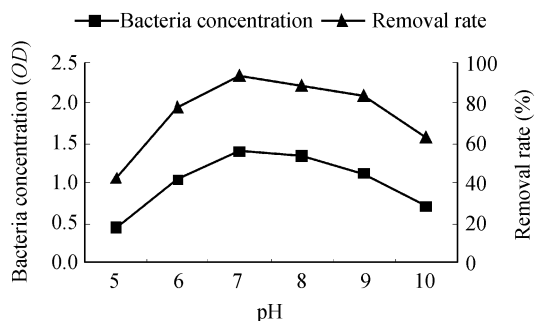


图 1 pH 对球形红细菌生长和邻二氯苯降解的影响  
Fig. 1 Degradation of 1,2-dichlorobenzene and bacteria growth under various pH

图 1 结果表明，pH 在 6.0~9.0 之间，菌株均能较好地生长，且邻二氯苯的去除率都大于 75%，在 pH 为 7.0 时，菌体的生长和邻二氯苯的去除率达最大

值，邻二氯苯的去除率为 93.2%，菌体浓度(OD)值为 1.407；在 pH 为 5.0 和 pH 为 10.0 时，菌体的生长受到抑制，邻二氯苯的去除率也较低，所以，菌体的生长和邻二氯苯的去除的最佳 pH 值为 7.0。

### 2.2 不同温度对 S 菌株降解邻二氯苯的影响

接种量 10%、厌氧光照、pH 为 7.0、邻二氯苯浓度 100 mg/L 时，S 菌株分别在 25、30、35 和 40 四种不同温度条件下，进行降解邻二氯苯的实验，反应时间 3 d，结果如图 2 所示。

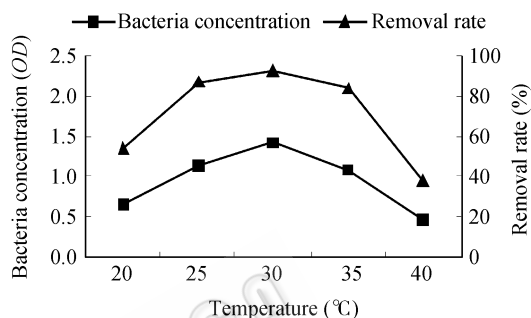


图 2 温度对球形红细菌生长和邻二氯苯降解的影响  
Fig. 2 Degradation of 1,2-dichlorobenzene under various temperature

从图 2 可看出，温度对菌体的生长有明显的影 响。在温度为 40 时，菌体几乎不生长；在 20 时，菌体的生长受到明显的抑制；温度为 25 和 35 之间时，菌体生长较好，其中 30 时的菌体浓度最高，其值为 1.142。因此，30 为细菌生长的最适温度；当温度为 20~30 时，邻二氯苯的去除效率随着温度的升高逐渐升高；30 时的菌体生长和邻二氯苯的去除效率达最高；当温度为 20 和 40 时，细菌生长缓慢，邻二氯苯的去除效果较差。因此，菌体的生长和邻二氯苯去除的最适宜温度为 30。

### 2.3 不同接种量对降解邻二氯苯的影响

为研究细菌接种量对降解邻二氯苯的影响，将细菌接种量按 3%、7%、10%、12%、15%(V/V)分别接入含 100 mg/L 邻二氯苯浓度的培养基中，在 30、pH 为 7.0 条件下进行厌氧光照培养 3 d，结果见图 3。

从图 3 细菌浓度曲线看到，当细菌接种量在 3%~10%时，培养 3 d 后的菌体浓度(OD 值)是随着细菌接种量的增加而明显地增加；当细菌接种量大于 10%后，随着细菌接种量的增加，菌体浓度(OD

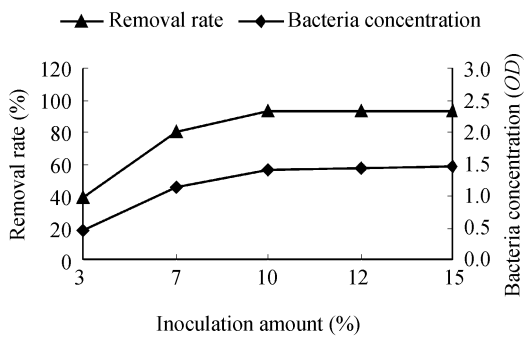


图3 接种量对细菌生长和降解邻二氯苯的影响  
Fig. 3 Degradation of 1,2-dichlorobenzene under various inoculation amount

值)基本保持不变。同样,邻二氯苯的去除率随细菌接种量的变化情况与细菌生长是一致的,并且当细菌接种量大于10%以上时,邻二氯苯的去除率都可达到90%以上。这是因为邻二氯苯的去除要求体系中要有一定量的菌体浓度,当细菌的接种量较低时,系统中的菌体浓度也比较低,菌体浓度成为细菌降解邻二氯苯的限制性因素;随着细菌接种量的增加,系统中的菌体浓度增大,邻二氯苯的去除率也随之快速增加;当细菌接种量增加到10%时,系统中的菌体量足以满足降解要求,这时去除率达较高的水平,此时如果继续增加细菌接种量,由于系统中菌体浓度不再制约细菌对邻二氯苯的降解过程,因此去除率也就不会随细菌接种量的增加而发生显著变化了。为保证较好的去除效果,确定最佳接种量为10%。

#### 2.4 S 菌株生长与对邻二氯苯降解的关系

为研究S菌株生长与对邻二氯苯降解的关系,在最佳实验条件下,即接种量10%、30、pH为7.0的条件下,将驯化后的S菌株接入含邻二氯苯100 mg/L的培养基中进行厌氧光照培养,每隔一定时间取样分析细菌浓度和降解液中的邻二氯苯浓度,实验结果如图4所示。

从图4邻二氯苯浓度的变化曲线可以看出,当处理时间12 h时,邻二氯苯浓度为29.4 mg/L,邻二氯苯的去除率达70.6%;处理时间72 h后,降解液中邻二氯苯浓度为6.7 mg/L,其去除率达93.3%;说明S菌株对邻二氯苯有处理效果;分析细菌生长曲线可知,细菌迟缓期明显延长,36 h后细菌才开始生长,这一现象与氯苯存在时球形红细菌生长情况不同<sup>[16]</sup>,分析其原因,可能是由于邻二氯苯的毒性大于氯苯,

球形红细菌在将大部分邻二氯苯降解完之后才进入快速生长阶段的缘故。

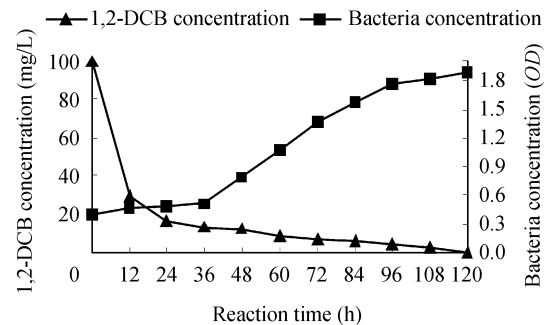


图4 球形红细菌对邻二氯苯的降解  
Fig. 4 Degradation of 1,2-dichlorobenzene by *Rhodobacter sphaeroides*

#### 2.5 S 菌株对邻二氯苯降解中间产物的分析

2.5.1 GC-MS 分析降解产物:对S菌株降解邻二氯苯的中间产物进行GC-MS分析,结果见图5、图6和图7。

从GC-MS图上看到邻二氯苯的出峰时间是在23.50 min,0 h邻二氯苯的峰高约30000;当它被S菌株降解54 h后,其峰高约3000,比0 h的峰高降低了大约90%,形成的主要中间产物是氯苯(出峰时间16.36 min),峰高约74000(图6);当处理时间162 h时,邻二氯苯的峰消失了,说明已被完全降解,氯苯峰高约为4600,从54 h到162 h,氯苯峰高降低了约93.4%。在邻二氯苯的降解过程中也出现了氯仿(出峰时间8.82 min),通过比较不同时刻氯仿的峰高可知,0 h、54 h、162 h氯仿的峰高分别约为2400、3000、2200,氯仿的量在反应过程中变化很小,氯仿是否为邻二氯苯降解中间产物还需进一步证实。根据S菌株降解邻二氯苯的GC-MS分析结果,可以认为邻二氯苯的降解主要是按照先脱掉一个氯原子生成氯苯,然后氯苯进一步脱氯开环降解的途径进行,其主要降解中间产物为氯苯。

2.5.2 4-羟基苯甲酸含量的分析:据文献报道,微生物厌氧降解芳香族化合物时,不同的芳香族化合物在苯环裂解之前首先经各种修饰化作用,如脱卤、脱羟基、脱甲氧基、脱氨基、脱烷基等,从而被转化为两种重要的中间体:苯甲酸和4-羟基苯甲酸。光合细菌在厌氧条件下降解芳香族化合物主要是通过苯甲酸和4-羟基苯甲酸两种途径进行开环降

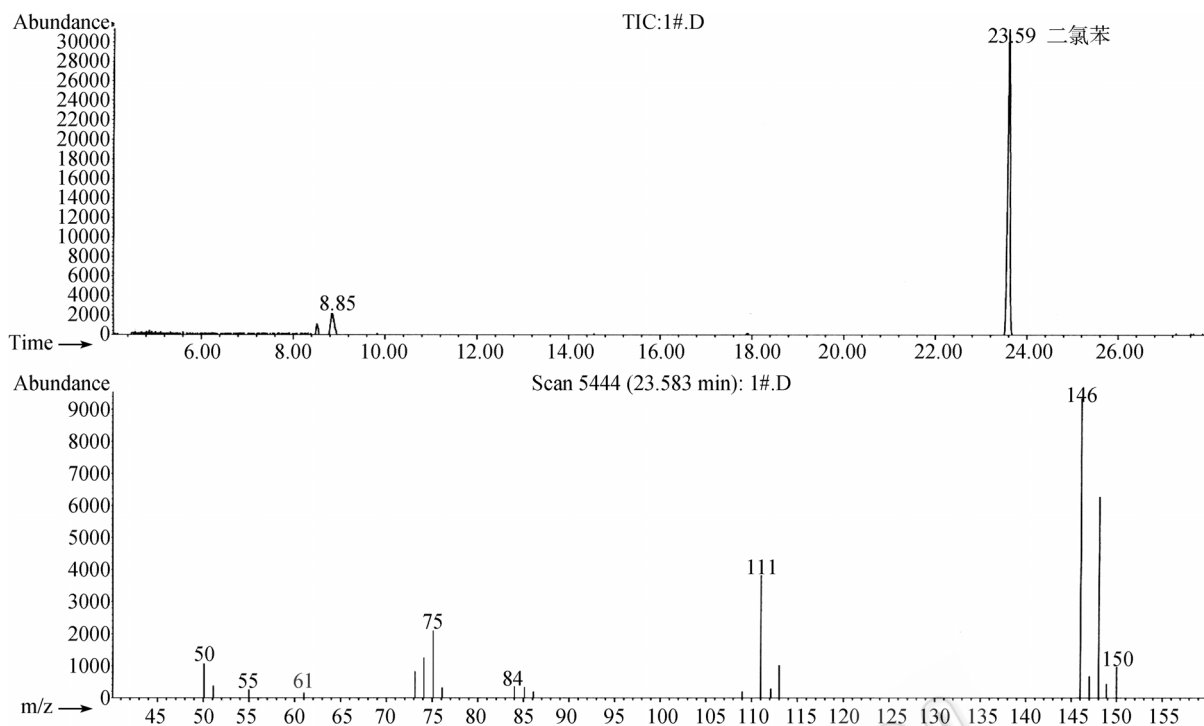


图5 球形红细菌降解邻二氯苯 0 h GC-MS 图

Fig. 5 GC-MS of 1,2-dichlorobenzene degradation products at 0h of the degradation

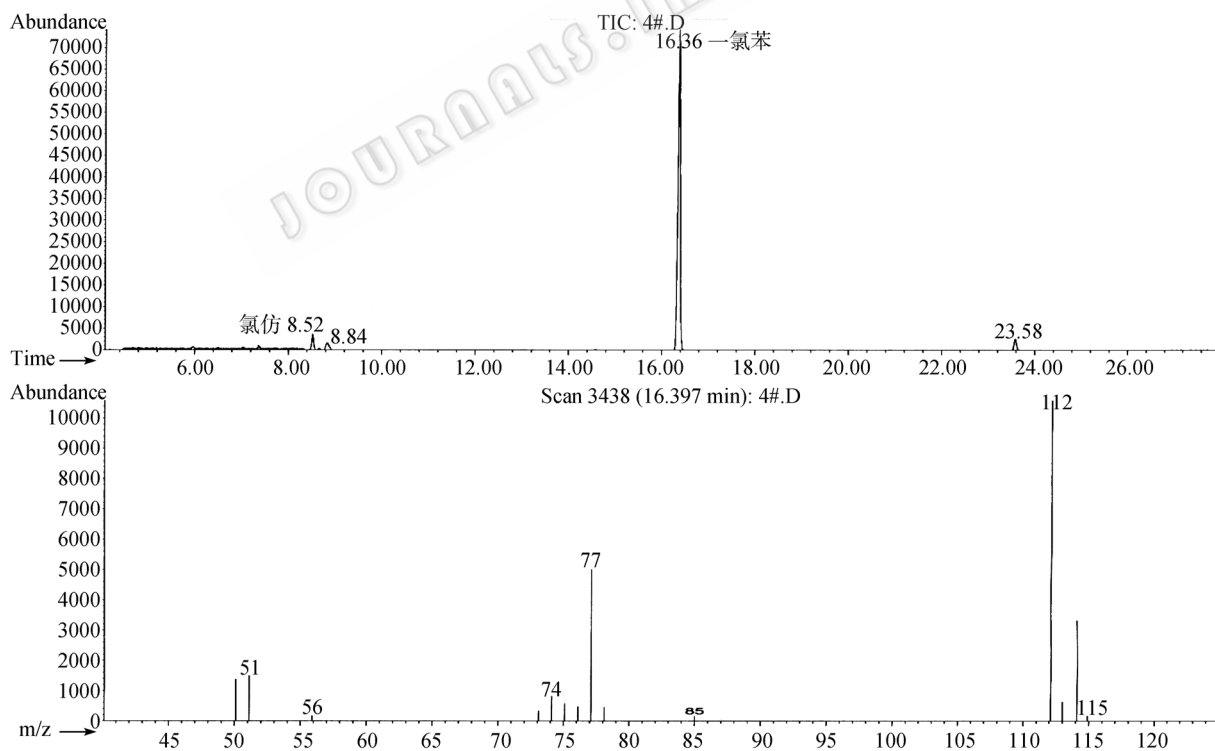


图6 球形红细菌降解邻二氯苯 54 h GC-MS 图

Fig. 6 GC-MS of 1,2-dichlorobenzene degradation products at 54 h of the degradation

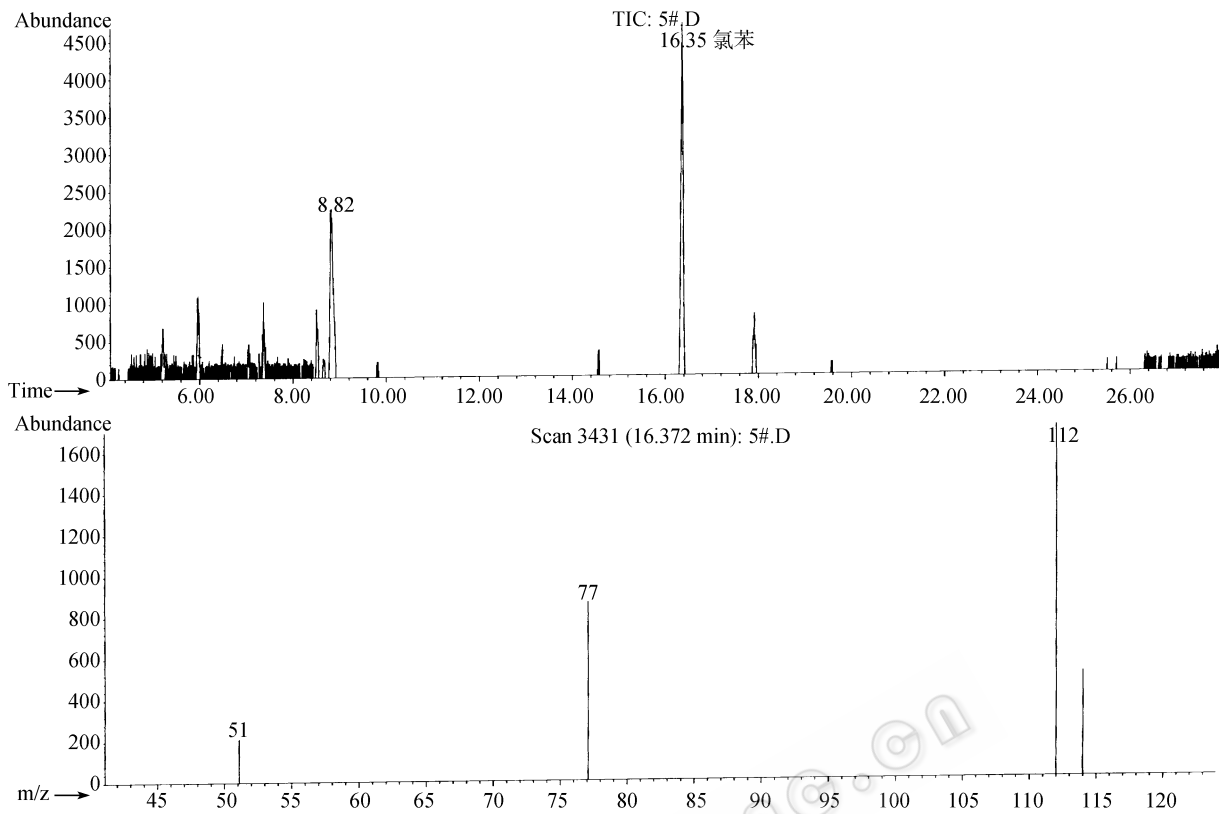


图 7 球形红细菌降解邻二氯苯 162 h GC-MS 图

Fig. 7 GC-MS of 1,2-dichlorobenzene degradation products at 162 h of the degradation

解的<sup>[12]</sup>。为确定S菌株厌氧降解邻二氯苯究竟是否按以上途径进行, 针对其不同时刻的降解产物进行了4-羟基苯甲酸含量的分析, 分析结果如图8所示。

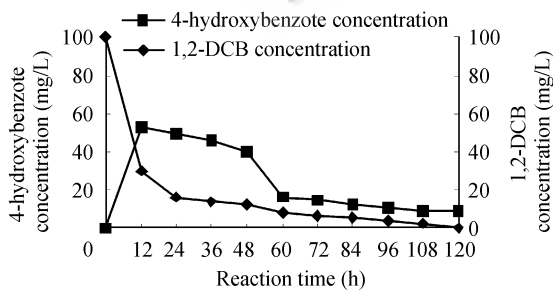


图 8 不同时刻 4-羟基苯甲酸含量变化曲线  
Fig. 8 Variation 4-hydroxybenzoate concentration

从图8可看出, 在邻二氯苯的降解过程中的确有中间产物4-羟基苯甲酸的产生, 并且4-羟基苯甲酸含量变化与邻二氯苯的浓度变化是密切相关的。在反应初期0 h~48 h, 邻二氯苯的去除速率最大, 88%的邻二氯苯被降解, 此时, 4-羟基苯甲酸浓度也处于较高的水平, 其中12 h和24 h时4-羟基苯甲酸

浓度最高, 分别为50.0 mg/L和53.0 mg/L; 60 h以后, 随着邻二氯苯被降解, 邻二氯苯的浓度处于较低的水平, 4-羟基苯甲酸浓度也大幅度降低。根据这一结果, 可推测出S菌株厌氧降解邻二氯苯主要是通过4-羟基苯甲酸的代谢途径开环完成的。

2.5.3 氯苯含量的分析: 根据GC-MS分析结果得知氯苯是邻二氯苯降解的主要中间产物, 为分析在邻二氯苯降解过程中氯苯浓度的变化情况, 将不同反应时刻降解产物中氯苯浓度测定值与反应时间作图, 见图9。

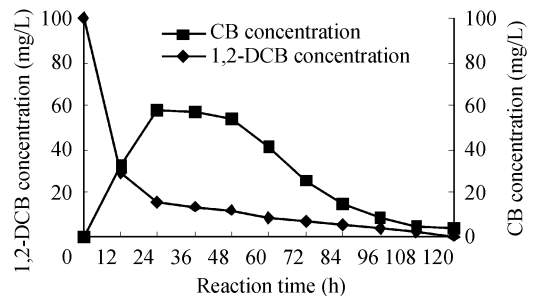


图 9 不同时刻氯苯的浓度变化曲线  
Fig. 9 Variation CB concentration

由图9可知,在降解时间0 h~24 h时,氯苯浓度随邻二氯苯浓度的快速降低而逐渐升高,并在24 h达最高值58.0 mg/L;从反应时间24 h~48 h,氯苯浓度维持较高水平,基本不变;在48 h~108 h之间,氯苯浓度的降解速率快速增加,氯苯浓度由54.5 mg/L减少到4.26 mg/L,去除率达92.18%;108 h以后,氯苯浓度基本保持不变。分析氯苯浓度变化原因,可能与邻二氯苯降解和细菌生长状况有关。在反应开始阶段邻二氯苯快速降解产生大量的氯苯,而此时S菌株受邻二氯苯的毒性作用处于迟缓期,细胞浓度和细菌活性都处于较低水平,造成氯苯的降解速率低于生成速率,使氯苯发生累积;48 h后,随着邻二氯苯浓度的减少,细菌活性逐渐恢复,细菌生长进入对数生长期,细胞浓度增加,氯苯的降解速率因此也迅速增加,氯苯浓度大幅度降低。

**2.5.4 脱氯率的分析:**脱氯反应是微生物降解氯代有机化合物最重要的反应步骤,为研究在S菌株厌氧降解邻二氯苯过程中,氯离子浓度的变化情况,测定不同反应时间的降解液中氯离子浓度,并计算脱氯率,结果见图10、图11。

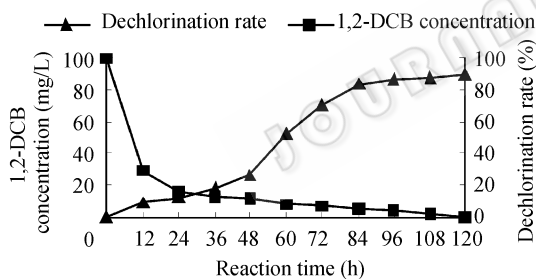


图10 脱氯率与邻二氯苯降解的关系曲线图  
Fig. 10 Relation dechlorination and 1,2-dichlorobenzene degradation

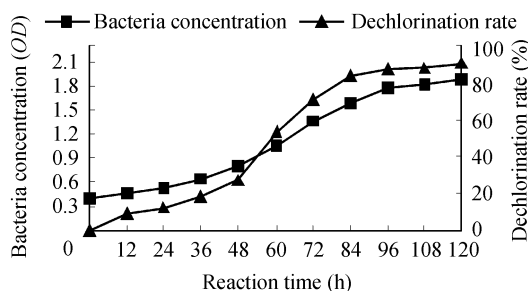


图11 脱氯率与细菌生长关系图  
Fig. 11 Relation dechlorination and bacteria growth

从图10邻二氯苯降解与脱氯率关系曲线可看出,反应时间0 h~24 h,反应物邻二氯苯浓度大幅度下降,24 h以后,随着反应的进行,邻二氯苯的去除速度逐渐减小;脱氯率随时间的变化趋势与邻二氯苯的降解不同,反应时间在24 h~84 h之间时,脱氯率增加的速度最快,96 h后,脱氯率上升趋势变缓。

分析图11看出,脱氯率的变化与细菌生长有一定的相关关系,在0 h~36 h细菌生长的迟缓期,脱氯率由0增加到18.3%,增加速率为0.508;在对数生长期36 h~108 h,脱氯率由18.3%增加到87.89%,增加速率为0.97,处于细菌对数生长期脱氯率的增加速率高于迟缓期,分析引起这种差异的原因主要是由于邻二氯苯的脱氯过程是与反应体系中的细菌浓度有关的缘故,在对数生长期脱氯率随细菌浓度的快速增加而增加。

### 3 结论

(1) 通过测定不同pH值、温度和接种量对S菌株生长及邻二氯苯去除的影响,确定了球形红细菌S菌株对邻二氯苯厌氧降解的最佳去除和生长条件分别为:pH 7.0,温度30℃,接种量10%。在最佳降解条件下,100 mg/L邻二氯苯72 h的去除率为93.3%。

(2) 球形红细菌厌氧降解邻二氯苯的主要中间产物是氯苯、4-羟基苯甲酸、氯离子。

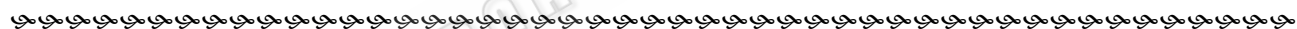
(3) 球形红细菌厌氧降解邻二氯苯的机理主要是按照先脱掉一个氯原子生成氯苯,然后氯苯进一步脱氯并通过4-羟基苯甲酸的代谢途径开环进行的。

(4) 在邻二氯苯的降解过程中,邻二氯苯的脱氯率与反应体系中的细菌浓度有很大的关系,脱氯率随细菌浓度的增加而显著增加。

### 参考文献

- [1] USEPA. Ambient water quality criteria for chlorinated-benzenes. EPA 440-/5-80/028. Department of Commerce National Technical Information Service VA 22151, 1980.
- [2] 汪光焘,肖绍雍,宋仁元,等. 城市供水行业技术进步发展规划. 北京:中国建筑工业出版社,1993, pp. 74-77.
- [3] Fennell DE, Nijenhuis I, Wilson SF, et al. Dehalococcoides ethenogenes strain 195 reductively dechlorinates diverse chlorinated aromatic pollutants. *Environmental*

- Science and Technology*, 2004, **38**(7): 2075–2081.
- [4] Jan Roelof van der Meer, Christoph Werlen, Shirley F Nishino, *et al.* Evolution of a pathway for chlorobenzene metabolism leads to natural attenuation in contaminated groundwater. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, **64**(11): 4185–4193.
- [5] 甘平, 朱婷婷, 樊耀波, 等. 氯苯类化合物的生物降解. *环境污染治理技术与设备*, 2000, **1**(4): 1–12.
- [6] Markus A, Krekel D, Lingens F. Purification and some properties of some properties of component A of the 4-chlorophenylacetate 3,4-dioxygenase from *Pseudomonas* species strain CBS. *J Biol Chem*, 1986, **261**(27): 12883–12888.
- [7] Schweizer D, Markus A, Seez M, *et al.* Purification and some properties of component B of the 4-chlorophenylacetate 3,4-dioxygenase from *Pseudomonas* species strain CBS3. *J Biol Chem*, 1987, **262**(19): 9340–9346.
- [8] Beil S, Happe B, Timmis KN. Genetic and biochemical characterization of the broad spectrum chloro-benzene dioxygenase from *Burkholderia* sp. strain PS12. *Eur J Biochem*, 1997, **247**: 190–199.
- [9] A chimlack, Georg Fuchs. Carboxylation of phenylphosphate by phenol carboxylase, an enzyme system of anaerobic phenol metabolism. *J Bacteriol*, 1992, **175**(6): 3629–3636.
- [10] AL Momani F, Touraud E, Degorce Dumas JR, *et al.* Biodegradability enhancement of textile wastewater by VUV photolysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2002, **153**(1): 191–197.
- [11] 李可, 张肇铭, 曹养宪. 沼泽红假单胞菌对活性紫KBR 脱色的研究. *中国环境科学*, 2004, **24**(3): 299–302.
- [12] Harwood CS, Gibson J. Anaerobic and aerobic metabolism of diverse aromatic compounds by the *Photosynthetic bacterium Rhodospseudomonas palustris*. *Appl Environ Microbiol*, 1988, **54**(3): 712–717.
- [13] Wright GE, Madigan MT. Photocatabolism of aromatic compound by the phototrophic purple bacterium *Rhodospseudomonas vannielii*. *Appl Environ Microbiol*, 1991, **57**(7): 2069–2073.
- [14] Blasco R, Castillo F. Light-dependent degradation of nitrophenols by the phototrophic Bacterium *Rhodobacter capsulatus* EIF1. *Appl Environ Microbiol*, 1992, **58**(2): 690–695.
- [15] 王玉芬, 张肇铭, 胡筱敏. 氯苯对球形红细菌毒性效应的研究. *安全与环境学报*, 2007, **7**(1): 1–4.
- [16] 王玉芬, 张肇铭, 胡筱敏, 等. 光合细菌球形红细菌厌氧降解氯代苯. *中国环境科学*, 2007, **27**(1): 111–115.
- [17] Fetzner S, MuÈller R, Lingens F. Purification and some properties of 2-halobenzoate 1,2-dioxygenase, a two-component enzyme system from *Pseudomonas cepacia* 2CBS. *J Bacteriol*, 1992, **174**(1): 279–290.



稿件书写规范

## 论文中阿拉伯数字的使用

凡是可以使用阿拉伯数字且很得体的地方均应使用阿拉伯数字。世纪、年代、年、月、日、时刻必须使用阿拉伯数字, 年份必须用全称。对科技期刊来说, 凡处在计量单位和计数单位前面的数字, 包括9以下的各位数字, 除个别特例外, 均应使用阿拉伯数字。不是表示科学计量和有统计意义数字的一位数可以用汉字, 例如: 一本教材, 两种商品等。